

УДК 622.271:681.5

DOI: 10.31474/2415-7902-2026-1-16-38-45

Григор'єв Ю.І., Швець Д.В., Григор'єв І.Є., Луценко С.О., Карабут Н.О.

## ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ І АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ РУДОПОТОКОМ ЗА ДОПОМОГОЮ МОБІЛЬНОГО СЕГРЕГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ

**Мета.** Мета роботи полягає у комплексному аналізі сучасного стану мінерально-сировинної бази Кривбасу, сформованої техногенними родовищами, обґрунтуванні технологічних схем із розробки і використанням мобільних сегрегаційних комплексів на техногенних родовищах, а також у розробці алгоритмів для адаптивного керування процесом сегрегації рудопотоку в режимі реального часу.

**Методика.** У статті використані комплексні методи дослідження для вирішення задачі підвищення ефективності підготовки мінеральної сировини в техногенному родовищі. Послідовно використано методи аналізу і синтезу наукових джерел інформації, а також патентний пошук, що дозволило комплексно систематизувати світовий і вітчизняний досвід по темі дослідження. Використано теорію вирішення винахідницьких задач для уточнення параметрів технології переробки техногенних родовищ, а також методи системного аналізу для формалізації процесів керування стохастичними потоками сировини.

**Результати.** Аналіз і синтез наукових джерел інформації підтвердив, що селективне відпрацювання техногенних родовищ є базовим елементом сталого розвитку гірничодобувної промисловості, а мінерально-сировинна база Кривбасу може бути розширена шляхом залучення у переробку сформованих техногенних родовищ. Проаналізовано морфологію техногенних покладів, сформованих бульдозерним та екскаваторним способами, та виявлено, що рудні лінзи мають геометричні параметри, сумірні або менші за параметри робочого обладнання, що призводить до значного розубожження при валовій виїмці. Для вирішення цієї проблеми запропоновано та обґрунтовано технологічну схему із застосуванням мобільного сегрегаційного комплексу, що працює безпосередньо у вибої. Технологія передбачає спільну роботу екскаватора та мобільного комплексу: гірничу масу завантажується в бункер, проходить стадію подрібнення та сортування, після чого кондиційна сировина відвантажується в засоби транспорту, а пуста порода через відвальну консоль повертається у вироблений простір, що мінімізує витрати на транспортування відходів.

Розроблено функціональну схему системи адаптивного керування рудопотоком. Запропоновано впровадження методів оперативного контролю безпосередньо на конвеєрі мобільного сегрегаційного комплексу. Система базується на комплексному використанні ядерно-фізичного методу – для визначення вмісту заліза загального та магнітометричного методу – для контролю вмісту заліза, пов'язаного з магнетитом. Описано конструктивну реалізацію блоку контролю якості мінеральної сировини.

**Наукова новизна.** Доповнено і вдосконалено теоретичні передумови сталого розвитку гірничодобувного кластеру Кривбасу. Формалізовано алгоритм адаптивного керування потоком мінеральної сировини в мобільному сегрегаційному комплексі за рахунок визначення вмісту заліза магнітного та загального.

**Практична значимість.** Запропоновані технологічні рішення дозволяють перетворити техногенні відвали на рентабельне джерело сировини, забезпечити стабільне завантаження збагачувальних фабрик та вивільнити значні площі земель, сприяючи покращенню екологічної ситуації в регіоні. Розроблена система автоматизації може бути ефективно використана при проектуванні робіт з гірничо-технічної рекультивації кар'єрів і техногенних утворень мінеральної сировини.

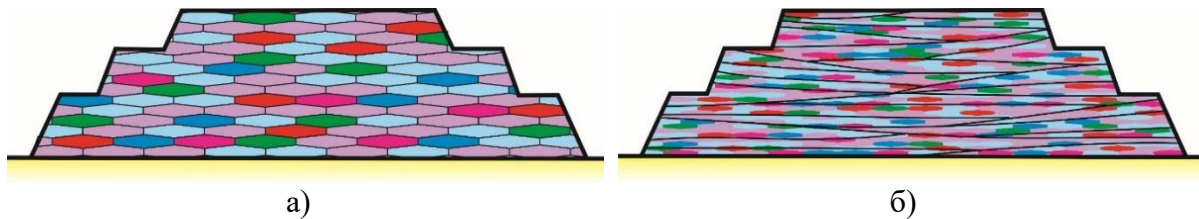
**Ключові слова:** техногенне родовище, мобільний сегрегаційний комплекс, адаптивне керування, ядерно-фізичний метод, магнітометричний метод, сталий розвиток.

**Вступ.** Сучасний етап функціонування гірничодобувної галузі України, зокрема з видобутку залізорудної сировини, характеризується переходом більшості глибоких кар'єрів Кривбасу у стадію виходу на кінцеві контури кар'єрів. Це супроводжується критичним ускладненням гірничо-геологічних умов їх функціонування. Як наслідок, стійка тенденція до поглиблення гірничих робіт неминуче призводить до скорочення геометричних параметрів робочої зони та зменшення фронту робіт. Це, у свою чергу, обмежує інтенсивність виймання гірничої маси. Ситуація ускладнюється зростанням гідрогеологічного навантаження та підвищенням коефіцієнта міцності порід на глибоких горизонтах, що вимагає застосування більш енергоємних технологій руйнування масиву.

Як наслідок, відбувається експоненціальне зростання собівартості видобутку товарної руди, що знижує рентабельність виробництва і загальну конкурентоздатність вітчизняних гірничодобувних підприємств. Паралельно з цим, зовнішнє економічне середовище господарювання демонструє високу волатильність: динаміка цін на світових ринках сировини та флуктуації попиту [1] вимагають від гірничо-видобувних підприємств миттєвої реакції, зокрема, через оперативний перегляд кондицій та мінімального промислового вмісту корисного компонента. Однак, кар'єр як складна геотехнічна система має значну виробничу інерційність. Традиційні технологічні схеми, розраховані на довгострокове планування, не здатні забезпечити необхідну адаптивність виробничих показників до турбулентних умов господарювання [2]. У цьому контексті стратегічним вектором розвитку стає диверсифікація сировинної бази за рахунок залучення техногенних родовищ, накопичених за десятиліття експлуатації надр. Як свідчать результати системних досліджень [3], ревалоризація таких об'єктів є не лише перспективним напрямком з точки зору ресурсозбереження, але й економічно обґрунтованим механізмом підвищення гнучкості функціонування гірничого підприємства [4, 5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ресурсний потенціал техногенних утворень Криворізького басейну є колосальним. Відвальні масиви гірничо-збагачувальних комбінатів фактично являють собою сформовані техногенні родовища із значними обсягами гематитових кварцитів, які за сучасних технологій збагачення можуть класифікуватися як кондиційна сировина. З точки зору генезису та якісних характеристик, ці об'єкти доцільно класифікувати на дві основні групи: склади крупнозернистого відсіву дробильно-сортувальних фабрик (із вмістом  $Fe_{заг}$  на рівні 40–45%) та безпосередньо масиви розубожених гематитових кварцитів у породних відвалах (із вмістом  $Fe_{заг}$  30–45%). Слід зазначити, що енергоємність переробки такої сировини є апіорі нижчою за рахунок відсутності витрат на буропідривні роботи та первинне транспортування з кар'єру. Показовим прикладом є техногенні поклади у відвалах кар'єрів №1 та №2 Центрального ГЗК, обсяг яких оцінюється у 40 млн т. Цей ресурсний актив обґрунтовано визначено другим за пріоритетністю джерелом гематитової сировини у структурі техногенних запасів басейну [6]. Масштаби накопичення техногенної сировини на інших підприємствах регіону також підтверджують необхідність перегляду стратегії надрокористування. Так, згідно з маркшейдерськими даними та результатами геологічної ревізії, відвали Південного ГЗК акумулювали 542,6 млн т гематитової сировини із середнім вмістом заліза 36%. Аналогічна ситуація спостерігається на відвалі №3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», де заскладовано близько 144,8 млн т сировини ідентичної якості [7]. Варто наголосити, що залучення цих обсягів у переробку дозволяє вирішити двоєдину задачу: забезпечити завантаження збагачувальних потужностей відносно дешевою сировиною та вивільнити значні площі земель, зайнятих під відвалами, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку [8].

Проте, перехід до практичної реалізації проєктів повторної розробки відвалів стикається з низкою технологічних бар'єрів, зумовлених специфікою їх формування. Хаотичне відсіпання порід автомобільним та залізничним транспортом призвело до формування складної, стохастичної внутрішньої структури масивів, що унеможливорює застосування стандартних підходів до селективного виймання. Особливу увагу слід приділити аналізу внутрішньої будови відвалів, сформованих автомобільним транспортом при бульдозерному відвалоутворенні (рис. 1а). В їх розрізах спостерігається дискретне накопичення матеріалу у вигляді дрібних лінзоподібних тіл. Геометричні параметри таких рудних лінз (потужність 1–2 м, протяжність 10–15 м) є сумірними або навіть меншими за параметри черпання сучасного виймально-навантажувального обладнання. Ще більша змішуваність мінералогічних різновидів спостерігається у відвалах, сформованих за технологією екскаваторного відвалоутворення (рис. 1б).



**Рисунок 1** – Схема внутрішньої будови складу гематитових кварцитів, сформованих за технологією а) бульдозерного і б) екскаваторного відвалоутворення

Крім того, процеси гравітаційної сегрегації при відсипанні призвели до того, що сусідні лінзи характеризуються значною варіативністю мінерального та хімічного складу. Все це в комплексі створює ефект високої внутрішньої неоднорідності масиву, де кондиційна руда перемішана з пустими породами. За таких умов, валове виймання призводить до неприпустимого розубоження, а класичне селективне виймання екскаватором є технічно неможливим.

**Мета статті (постановка завдання).** Таким чином, окреслені аргументи актуалізують наукову задачу обґрунтування нових технологічних схем із розробки і використанням мобільних сегрегаційних комплексів в забої, а також наукового забезпечення процесу сегрегації порід безпосередньо в цих комплексах.

**Методи дослідження.** Методологічну основу роботи складає комплексний системний підхід, що поєднує теоретичні та емпіричні методи дослідження для вирішення задачі підвищення ефективності підготовки мінеральної сировини в техногенному родовищі. На першому етапі застосовано методи аналізу та синтезу літературних джерел і патентної інформації, що дозволило систематизувати світовий і вітчизняний досвід створення мобільних сегрегаційних комплексів. Виявлені на цьому етапі технічні та фізичні протиріччя між вимогою мобільності комплексу та необхідністю забезпечення високої продуктивності і якості сегрегації були вирішені із застосуванням інструментарію теорії вирішення винахідницьких задач. Використання прийомів усунення технічних протиріч та законів розвитку технічних систем дозволило обґрунтувати нові компоновальні рішення та структурну організацію мобільного сегрегаційного комплексу. Для формалізації об'єкта дослідження використано методи системного аналізу, в рамках яких мобільний сегрегаційний комплекс розглядається як складна динамічна система із вхідними стохастичними потоками сировини.

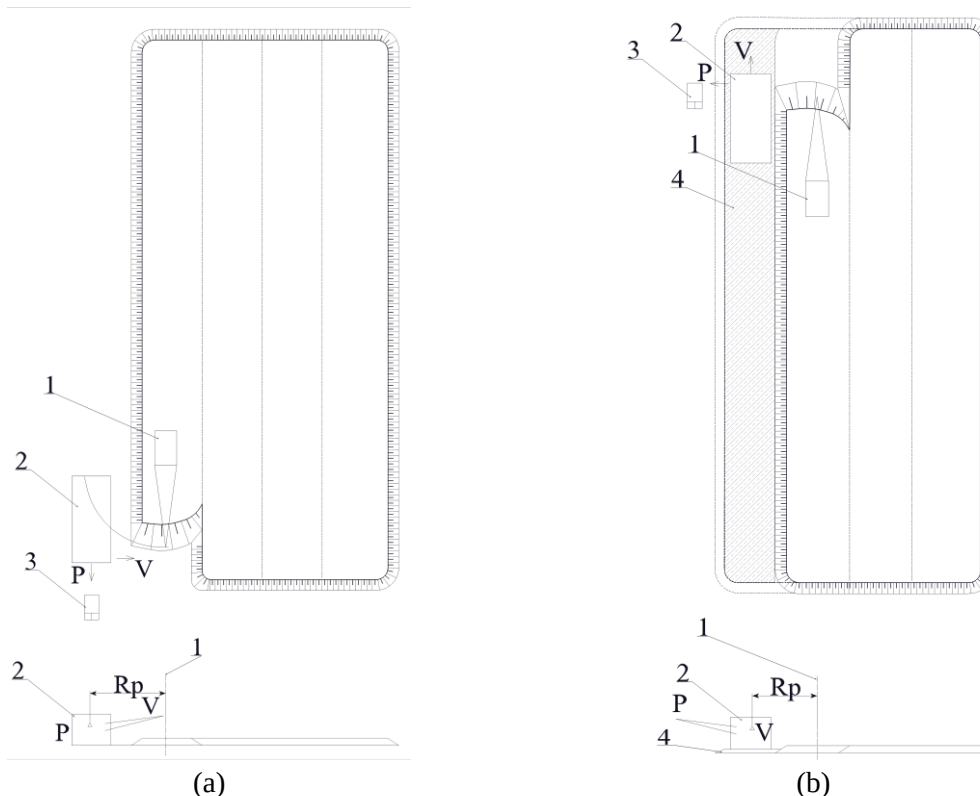
**Виклад основного матеріалу.** Для подальшого дослідження пропонується мобільний сегрегаційний комплекс, загальна функціональна схема якого запропонована у роботі [7]. Робота сегрегаційного мобільного комплексу за основною технологічною схемою може бути описана згідно рис. 2. На верхній площадці уступу техногенного родовища розміщується екскаватор з великими робочими параметрами (1). В залежності від гранулометричного розподілу заскладованих порід і параметрів системи розробки це може бути драглайн або пряма механічна лопата з подовженою стрілою. Екскаватор зворотнім ходом виймає техногенну мінеральну сировину поздовжньою заходкою. Після екскавації мінеральна сировина перевантажується у приймальний бункер мобільного сегрегаційного комплексу (2), що виконує подрібнення породи і розділення за вмістом корисного компоненту. Далі корисний компонент перевантажується рудною консоллю в засоби транспорту (3); пуста порода за допомогою відвальної консолі повертається у новостворений вироблений простір першої екскаваторної заходки.

Після відпрацювання екскаватором першої заходки він розвертається і зворотнім ходом відпрацьовує другу заходку. Мобільний сегрегаційний комплекс при цьому розташовується на першому шарі (4) відсипаних пустих порід. Далі відповідно пуста порода укладається за допомогою відвальної консолі у вироблений простір першої екскаваторної заходки, а корисна копалина направляється у засоби транспорту, що

подаються наскрізною заходкою. В подальшому технологічний цикл повторюється до повного відпрацювання техногенного родовища.

Використання даного комплексу може бути актуальним і при гірничо-технічній рекультивації глибоких затоплених кар'єрів, що також актуально в умовах Криворізького гірничодобувного кластеру. Оскільки в цьому випадку відвальна ємність практично необмежена параметрами елементів системи розробки, технологічна схема буде значно простішою, а довжина відвальної консолі визначатиметься шириною призми обвалення.

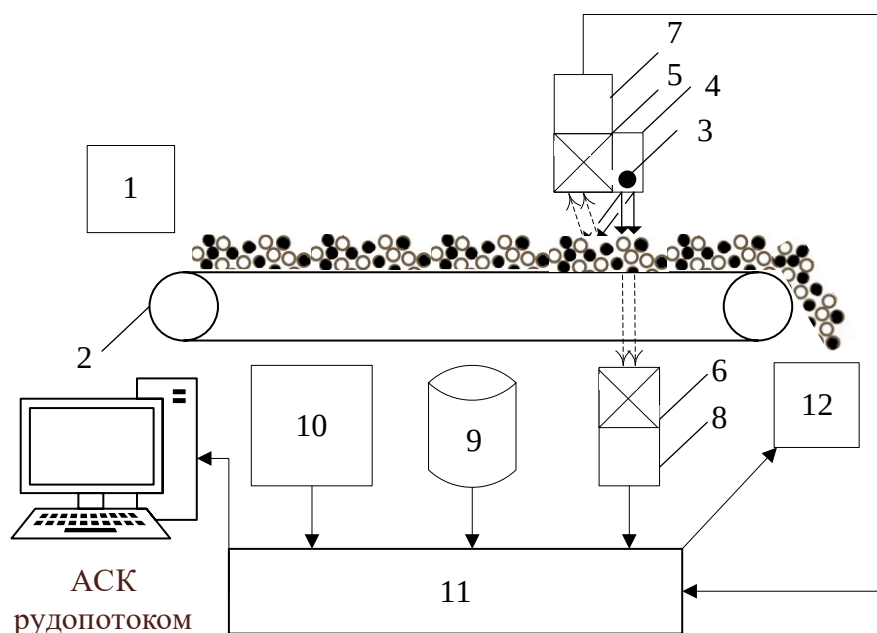
При відпрацюванні техногенних родовищ доцільним є визначення відсотку заліза в загальному обсязі рудної маси (вмісту корисного компоненту). Стабілізація масової долі заліза в рудопотоці дозволяє забезпечити сталу якість залізорудної сировини для рудозбагачувальних фабрик шляхом формування рудних вантажопотоків із заданими показниками вмісту корисного компоненту. Традиційні методи хімічного аналізу не забезпечують необхідної оперативності та потребують близько двох годин [9] для встановлення якісних характеристик рудної маси. Тому для вирішення завдань технологічного контролю та управління видобутком доцільно застосовувати методи оперативного непрямого контролю.



**Рисунок 2** – Порядок відпрацювання першої (а) і другої (б) заходки техногенного родовища драглайном з використанням мобільного сегрегаційного комплексу: 1 – драглайн; 2 – мобільний сегрегаційний комплекс; 3 – автосамоскид; 4 – перший шар відсипаної некондиційної сировини

Відоме рішення [10] полягає у використанні радіометричного методу у складі мобільного дробильно-сортувального комплексу. При його реалізації пропонується використання ядерно-фізичного методу [11], що дозволяє визначати вміст заліза загального ( $Fe_3$ ). Проте, для покращення інформаційного забезпечення процесу переробки рудного матеріалу та реалізації адаптивного керування рудопотоком доцільне додаткове використання магнітометричних методів [12], що роблять можливим визначення вмісту заліза, пов'язаного з магнетитом ( $Fe_m$ ), у мінеральній сировині.

Розглянемо функціональну схему (рис. 3), що відображає сукупність конструктивних елементів мобільного сегрегаційного комплексу, які забезпечують контроль вмісту  $Fe_3$  та  $Fe_m$  в рудопотоці (блок контролю якості мінеральної сировини).



**Рисунок 3** – Сукупність конструктивних елементів мобільного сегрегаційного комплексу, що забезпечують контроль вмісту  $Fe_3$  та  $Fe_m$  в рудопотоці: 1 – віброгрохот; 2 – конвеєр; 3 – джерело іонізуючого випромінювання; 4 – захисна оболонка; 5,6 – сцинтиляційні детектори; 7,8 – фотоелектронні помножувачі; 9 – датчик магнітної сприйнятливості; 10 – вимірювач ваги рудної маси; 11 – мікроконтролер; 12 – шибєрний пристрій

Функціонально зазначений блок складається з джерела іонізуючого випромінювання (3), що розміщено у захисній оболонці (4); сцинтиляційних детекторів (5, 6); фотоелектронних помножувачів (7, 8); вимірювача магнітної сприйнятливості мінеральної сировини (9); вимірювача ваги мінеральної сировини (10); блоку мікроконтролера (11) та комп'ютеризованої системи, що забезпечує адаптивне керування рудопотоком на базі інформації про вміст  $Fe_3$  та  $Fe_m$  з використанням шибєрного пристрою (12).

Рудний матеріал з віброгрохоту (1) подається на конвеєр (2). Фотони гамма-випромінювання випускаються джерелом (3), що містить ізоотп (Am-241 або Co-57) у захисній оболонці (4), і опромінюють мінеральну сировину, що знаходиться на конвеєрі (2). Частина фотонів гамма-випромінювання відбивається від поверхні рудного матеріалу під кутом, що варіюється залежно від геометричних параметрів розташування елементів підсистеми, характеристик колімаційного каналу, а також від параметрів використаного ізоотпу. Інша частина фотонів гамма-випромінювання проходить крізь шар рудного матеріалу. Відбиті від поверхні матеріалу фотони гамма-випромінювання та ті, що пройшли крізь шар руди, реєструються, відповідно, сцинтиляційними детекторами (5, 6) та підсилюються фотоелектронними помножувачами (7, 8).

Вимірювач магнітної сприйнятливості мінеральної сировини (9), своєю чергою, встановлюється нерухомо під конвеєром на певній відстані, при цьому поперечні провідники формуються таким чином, щоб реалізувати збереження однакової відстані від них до рудної маси. Ця умова дозволяє забезпечити рівномірність магнітного поля та чутливість перетворювача по всій ширині рудопотоку.

Інформація від сцинтиляційних детекторів та вимірювача магнітної сприйнятливості подається у блок мікроконтролера 11, а потім у комп'ютеризовану

систему керування рудопотоком. Система паралельно отримує дані з ваговимірювача руди (10), що дає можливість співвіднести показники якості з обсягом проходження сировини.

На основі аналізу вмісту  $Fe_z$  та  $Fe_m$  в реальному часі комп'ютеризована система керування відправляє команди на шиберний пристрій (12), який перенаправляє потік матеріалу в залежності від його якості. Кондиційна сировина завантажується в самоскиди через рудну консоль, а некондиційна маса (порожня порода) відкидається назад у відпрацьований простір кар'єру через відвальну консоль.

Таким чином, зазначена адаптивна система керування рудопотоком забезпечує цикл «вимірювання – аналіз – сортування» безпосередньо на борту мобільного комплексу, мінімізуючи час реакції на зміну якості сировини.

**Висновки.** Дослідження підтвердило стратегічну необхідність залучення техногенних родовищ для підтримки сировинної бази Кривбасу, що вимагає нових технологічних підходів через значну структурну неоднорідність відвальних масивів. Обґрунтовано ефективність застосування мобільного сегрегаційного комплексу, який забезпечує розділення гірничої маси безпосередньо у вибої з миттєвим поверненням відходів у вироблений простір, що мінімізує витрати на транспортування. Для практичної реалізації цієї технології розроблено систему адаптивного керування рудопотоком, яка використовує радіометричні та магнітометричні датчики для оперативного контролю вмісту заліза в режимі реального часу, нівелюючи інерційність традиційного хімічного аналізу. Перспективи подальших досліджень полягають у розробці програмних алгоритмів для синхронізації даних з радіометричних та магнітометричних датчиків з роботою приводу шиберного пристрою в умовах високої стохастичності якісних характеристик мінеральної сировини, а також розробці нових і вдосконаленні існуючих технологічних схем експлуатації мобільного сегрегаційного комплексу.

### Список літератури

1. Rimélé A., Dimitrakopoulos R., Gamache M. A dynamic stochastic programming approach for open-pit mine planning with geological and commodity price uncertainty. *Resources Policy*. 2020. Vol. 65. P. 101570. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101570>
2. Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty / M. Armstrong et al. *Resources Policy*. 2021. Vol. 72. P. 102086. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102086>
3. Waste management in the mining industry of metals ores, coal, oil and natural gas - A review / S. Kalisz et al. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 304. P. 114239. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114239>
4. Recycling and Reuse of Mine Tailings: A Review of Advancements and Their Implications / F. S. M. Araujo et al. *Geosciences*. 2022. Vol. 12, no. 9. P. 319. URL: <https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>
5. Matinde E. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018. Vol. 118, no. 8. URL: <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5>
6. Batur M., Babii K. Spatial assessment of air pollution due to mining and industrial activities: a case study of Kryvyi Rih, Ukraine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 970, no. 1. P. 012004. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012004>
7. Enhancing the adaptability of a mining complex in a dynamic environment by utilizing the technology for the development of a man-made deposit with a mobile ore preparation complex / Y. Hryhoriev et al. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1348. P. 012007. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012007>
8. Incorporating sustainable development in the design of mineral processing operations – Review and analysis of current approaches / B. C. McLellan et al. *Journal of Cleaner Production*. 2009. Vol. 17, no. 16. P. 1414–1425. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.06.003>
9. Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at open and underground extraction / A. Azaryan et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, no. 5-95. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144003>

10. Мобільний подрібнювально-сортувальний пристрій : пат. 85053 Україна : МПІК (2013.01) B07B 1/00. № u201305406 ; заявл. 26.04.2013 ; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21. 2 с.
11. A Compton scattering background subtraction method of gamma energy spectrum based on Gaussian function convolution / R.-l. Qin et al. Radiation Physics and Chemistry. 2024. P. 112202. URL: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112202>
12. Tverdostup M. On measuring the components of inductive impedance using the three voltmeter method. System technologies. 2024. Vol. 1, no. 150. P. 135–140. URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-150-2024-13>

## References

1. Rimélé A., Dimitrakopoulos R., Gamache M. (2020) A dynamic stochastic programming approach for open-pit mine planning with geological and commodity price uncertainty. Resources Policy. Vol. 65. pp. 101570.
2. Armstrong M., Lagos T., Emery X., Homem-de-Mello T., Lagos G., Sauré D. (2021) Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty. Resources Policy. Vol 72. pp. 102086.
3. Kalisz S., Kibort K., Mioduska J., Lieder M., Małachowska A. (2022) Waste management in the mining industry of metals ores, coal, oil and natural gas - A review. Journal of Environmental Management. Vol 304. pp. 114239.
4. F. S. M. Araujo, Taborda-Llano I., Nunes E. B., Santos R. M. (2022) Recycling and Reuse of Mine Tailings: A Review of Advancements and Their Implications. Geosciences. 2022. Vol. 12, № 9. P. 319.
5. Matinde E. (2018) Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 118, № 8.
6. Batur M., Babii K. (2022) Spatial assessment of air pollution due to mining and industrial activities: a case study of Kryvyi Rih, Ukraine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 970, № 1. P. 012004.
7. Hryhoriev Y., Shvets Y., Joukov S., Smirnov O., Hryhoriev I. (2024) Enhancing the adaptability of a mining complex in a dynamic environment by utilizing the technology for the development of a man-made deposit with a mobile ore preparation complex. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 1348. P. 012007.
8. McLellan B.C., Corder G.D., Giurco D., Green S. (2009) Incorporating sustainable development in the design of mineral processing operations – Review and analysis of current approaches. Journal of Cleaner Production. Vol. 17, № 16. P. 1414–1425.
9. Azaryan A., Gritsenko A., Trachuk A., Shvets D. (2018). Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at open and underground extraction. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 5, № 5-95.
10. Mobile crushing and sorting device [Mobilnyi podribniuvalno-sortuvalnyi prystrii]: pat. 85053 Ukraine. № u201305406; declared 26.04.2013; published 11.11.2013. Bulletin no. 21. 2 p. (in Ukrainian).
11. Qin R.-l., Li C.-y., Qin Z.-j., Zhang Z.-h., Cai J. (2024) A Compton scattering background subtraction method of gamma energy spectrum based on Gaussian function convolution. Radiation Physics and Chemistry. Vol. 226, P. 112202.
12. Tverdostup M. On measuring the components of inductive impedance using the three voltmeter method. System technologies. 2024. Vol. 1, № 150. P. 135–140.

Надійшла до редакції 18.01.2026

**Hryhoriev Y. I., Shvets D. V., Hryhoriev I. Y., Lutsenko S. O., Karabut N. O.**

### JUSTIFICATION OF TECHNOLOGICAL SCHEMES AND ADAPTIVE ORE FLOW CONTROL USING A MOBILE SEGREGATION COMPLEX

**Purpose.** The purpose of this study is to perform a comprehensive analysis of the current state of the mineral resource base of the Kryvbas region, formed by technogenic deposits; to substantiate technological schemes for their development using mobile segregation complexes; and to develop algorithms for adaptive, real-time control of the ore flow segregation process.

**Methodology.** The study employs an integrated set of research methods to improve the efficiency of mineral raw material preparation in technogenic deposits. Methods of analysis and synthesis of scientific literature, as well as patent searches, were consistently applied, enabling a systematic generalization of international and domestic experience related to the research topic. The theory of inventive problem solving was used to refine the parameters of technogenic deposit processing technologies, while systems analysis methods were applied to formalize control processes for stochastic raw material flows.

**Results.** The analysis and synthesis of scientific sources confirmed that selective mining of technogenic deposits is a fundamental component of the sustainable development of the mining industry, and that the mineral

resource base of Kryvbas can be expanded by involving existing technogenic deposits in processing. The morphology of technogenic accumulations formed by bulldozer and excavator methods was analyzed, revealing that ore lenses often have geometric parameters comparable to or smaller than those of the working equipment, which leads to significant dilution during bulk excavation. To address this issue, a technological scheme employing a mobile segregation complex operating directly in the mining face is proposed and substantiated. The technology involves joint operation of an excavator and the mobile complex: the rock mass is loaded into a hopper, crushed and sorted, after which conditioned material is transferred to transport units, while waste rock is returned to the mined-out space via a stacker boom, thereby minimizing waste transportation costs.

A functional scheme of an adaptive ore flow control system has been developed. Proposed is the implementation of operational control methods directly on the conveyor of the mobile segregation complex. The system is based on the combined use of a nuclear-physical method to determine total iron content and a magnetometric method to control the iron content associated with magnetite. The structural design of the mineral raw material quality control unit is described.

**Scientific novelty.** The theoretical foundations of sustainable development of the Kryvbas mining cluster have been extended and refined. An algorithm for adaptive control of mineral raw material flow in a mobile segregation complex has been formalized based on the determination of magnetic and total iron content.

**Practical significance.** The proposed technological solutions enable transforming technogenic dumps into a profitable source of raw materials, ensure stable loading of beneficiation plants, and free up significant land areas, thereby improving the environmental situation in the region. The developed automation system can be effectively applied in the design of mining and technical reclamation of quarries and technogenic mineral raw material formations.

**Keywords:** *technogenic deposit, mobile segregation complex, adaptive control, nuclear-physical method, magnetometric method, sustainable development.*

### **Відомості про авторів**

**Григор'єв Юліан Ігорович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відкритих гірничих робіт, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна, ORCID: 0000-0002-1780-5759, [yulian.hryhoriev@knu.edu.ua](mailto:yulian.hryhoriev@knu.edu.ua)

**Швець Дмитро Валерійович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна, ORCID: 0000-0001-5126-6405, [dmitriy.shvets@knu.edu.ua](mailto:dmitriy.shvets@knu.edu.ua)

**Григор'єв Ігор Євгенійович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничої справи, ТОВ «Технічний університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна ORCID: 0009-0006-2787-106X, [igor.hryhoriev@mipolytech.education](mailto:igor.hryhoriev@mipolytech.education)

**Луценко Сергій Олександрович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відкритих гірничих робіт, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна, ORCID: 0000-0002-5992-3622, [lutsenkoserhii@knu.edu.ua](mailto:lutsenkoserhii@knu.edu.ua)

**Карабут Надія Олександрівна**, старший викладач кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна, ORCID: 0000-0002-2327-4595, [karabut@knu.edu.ua](mailto:karabut@knu.edu.ua)

**Hryhoriev Yulian Ihorovich**, Ph.D., Associate Professor of the Open-Pit Mining Department, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, ORCID: 0000-0002-1780-5759, [yulian.hryhoriev@knu.edu.ua](mailto:yulian.hryhoriev@knu.edu.ua)

**Shvets Dmytro Valeriyovych**, Ph.D., Associate Professor of the Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, ORCID: 0000-0001-5126-6405, [dmitriy.shvets@knu.edu.ua](mailto:dmitriy.shvets@knu.edu.ua)

**Hryhoriev Ihor Yevhenovych**, Ph.D., Associate Professor of the Mining Department, LLC "Technical University "METINVEST POLYTECHNIC", Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID: 0009-0006-2787-106X, [igor.hryhoriev@mipolytech.education](mailto:igor.hryhoriev@mipolytech.education)

**Lutsenko Serhii Oleksandrovich**, Ph.D., Associate Professor of the Open-Pit Mining Department, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, ORCID: 0000-0002-5992-3622, [lutsenkoserhii@knu.edu.ua](mailto:lutsenkoserhii@knu.edu.ua)

**Karabut Nadiya Oleksandrivna**, Senior Lecturer, Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, ORCID: 0000-0002-2327-4595, [karabut@knu.edu.ua](mailto:karabut@knu.edu.ua)